УДК 533.6

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГРУППОВОГО ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СИЛЫ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ НА БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ТРАССЕ

В.К. Якушев

Томский государственный университет
E-mail: ntn@ftf.tsu.ru

Рассматривается новый способ определения коэффициента силы лобового сопротивления, основанный на регистрации в одном опыте параметров движения двух тел — исследуемого и контрольного. Излагается методика баллистического эксперимента. Для определения искомых коэффициентов приводятся расчетные уравнения, вид которых зависит от выбора аэродинамической формы контрольного тела.

При исследовании тел с новыми аэродинамическими формами возникает важный класс внешнебаллистических задач. В нем движение тела задано и требуется определить силы и моменты, под действием которых это движение совершается. Параметры движения в этом случае определяются экспериментально на баллистической трассе. Успех решения данных задач зависит от выбранной модели движения, методики проведения эксперимента и обработки полученных экспериментальных данных.

Одной из составляющих результирующей аэродинамической силы, действующей на тело в полете, является сила лобового сопротивления, которая определяется значением безразмерного коэффициента C_x. Традиционные способы нахождения этого коэффициента на баллистической трассе предполагают определение координат характерных точек тела в заданных сечениях траектории и временных интервалов между моментами регистрации координат [1]. Дополнительно до опыта определяются параметры среды и массово-геометрические характеристики исследуемого тела. Вид расчетных формул для нахождения C_x определяется той математической моделью и теми ограничениями на физическую картину рассматриваемого явления, которые принимаются для описания процесса движения тела на траектории [1, 2]. Недостатки такого подхода известны и связаны с необходимостью нахождения значений скорости тела на блокируемом участке траектории, которые не измеряются в опыте, а определяются расчетом по полученным перемещениям характерных точек тела в дискретные моменты времени [3]. Нахождение скорости тела является операцией дифференцирования, которая приводит к более существенным ошибкам, чем ошибки исходных данных. В общем случае скорость тела является нелинейной функцией времени. Поэтому возникают дополнительные ошибки при осреднении скорости. Следует заметить, что часто определяется не коэффициент C_x в какой-то конкретной точке, а его среднее значение на некотором участке траектории [1]. Кроме того, число пространственно-временных измерений в одном опыте зависит от вида зависимости коэффициента C_x от массово-геометрических характеристик тела. Поэтому для каждого класса исследуемых тел необходимо разрабатывать свою методику проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных. Это всегда ведет к усложнению экспериментальных исследований, увеличению стоимости применяемого оборудования и удлинению сроков проведения экспериментов.

Ниже предлагается новый способ определения коэффициента C_x, основанный на регистрации в

одном опыте параметров движения группы тел (двух или более) [4]. Сущность способа поясняется на рис. 1, где дана схема его реализации на измерительном участке траектории. Способ в общем виде реализуется следующим образом [5]. Производят параллельное и прямолинейное метание двух тел различной формы, размеров и массы (исследуемого "*и*" и контрольного "*к*") таким образом, чтобы в момент времени t_0=0 оба тела с одинаковой скоростью пролетели начальное сечение регистрации "0". На измерительном участке траектории осуществляют одновременно регистрацию координат этих тел в начальном "0", первом "1" и втором "2" сечениях регистрации относительно неподвижной системы координат ОХУ и определяют величины перемещения характерных точек исследуемого и контрольных тел $x_{и1}$, $x_{к1}$ за время t_1, $x_{и2}$, $x_{к2}$ за время t_2. Коэффициенты лобового сопротивления $C_{xи}$ исследуемого и $C_{xк}$ контрольного тел предполагают постоянными на измерительном участке траектории. Это предположение является общепринятым и выполняется достаточно точно, так как измерения производятся на участке трассы небольшой протяженности.

Прямолинейное движение центров масс двух тел при отсутствии взаимодействия их обтекания можно описать известной системой дифференциальных уравнений [3]:

$$m_и \frac{d^2x}{dt^2} = -C_{xи}\frac{\rho S_и}{2}\left(\frac{dx}{dt}\right)^2, \qquad m_к \frac{d^2x}{dt^2} = -C_{xк}\frac{\rho S_к}{2}\left(\frac{dx}{dt}\right)^2, \qquad (1)$$

где $m_и$ и $m_к$ – массы; $S_и$ и $S_к$ – площади миделевого сечения исследуемого и контрольного тел; ρ – плотность газовой среды.

Дважды интегрируя (1) при начальных условиях t_0=0, x_0=0, V=V_0 получают зависимости для перемещений тел за промежуток времени t_1 между начальным "0" и "1" сечениями регистрации

$$x_{и1}\, b_и\, C_{xи} = \ln(b_и\, C_{xи}\, V_0\, t_1 + 1); \qquad x_{к1}\, b_к\, C_{xк} = \ln(b_к\, C_{xк}\, V_0\, t_1 + 1), \qquad (2)$$

где $b_и = \frac{\rho S_и}{2m_и}, b_к = \frac{\rho S_к}{2m_к}$ коэффициенты, включающие постоянные параметры соответственно исследуемого и контрольного тел.

Потенцируя (2) и исключая множитель V_0t_1, получают уравнение

$$\frac{e^{x_{и1} b_и C_{xи}} - 1}{b_и C_{xи}} = \frac{e^{x_{к1} b_к C_{xк}} - 1}{b_к C_{xк}}. \qquad (3)$$

Аналогично (2) составляют систему уравнений для перемещений исследуемого и контрольного тел за время t_2 между начальным "0" и "2" сечениями регистрации, которая после преобразований имеет вид

$$\frac{e^{x_{и2} b_и C_{xи}} - 1}{b_и C_{xи}} = \frac{e^{x_{к2} b_к C_{xк}} - 1}{b_к C_{xк}}. \qquad (4)$$

Выражения (3) и (4) образуют систему двух уравнений с двумя неизвестными коэффициентами лобового сопротивления исследуемого $C_{xи}$ и контрольного $C_{xк}$ тел.

Величины ρ, $m_и$, $m_к$, $S_и$, $S_к$ определяются до опыта. Перемещения $x_{и1}$, $x_{и2}$, $x_{к1}$, $x_{к2}$ за промежуток вре-

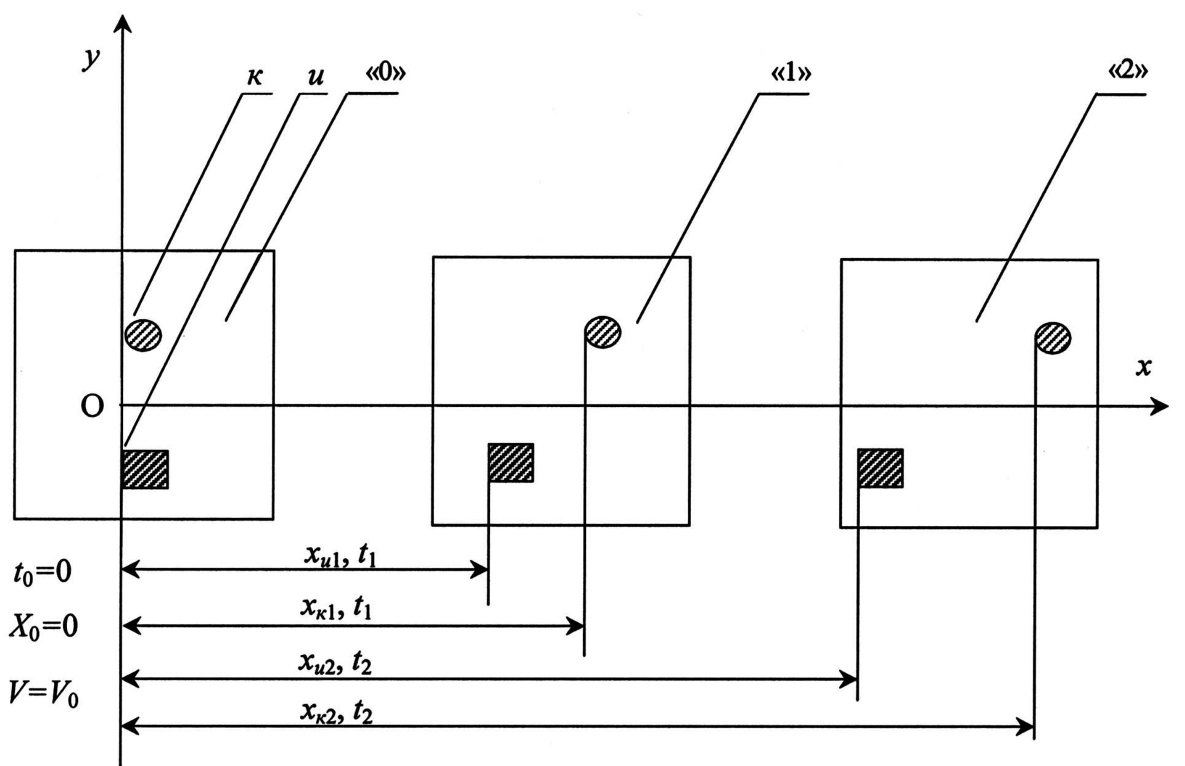


Рис. 1. *Схема реализации способа на измерительном участке траектории*

мени t_1 и t_2 получают с точностью, определяемой разрешающей способностью фотоматериалов, юстировкой баллистической трассы и выбранной оптической схемой системы фотографирования [6]. При этом методическая ошибка предлагаемого способа обусловлена предположением равенства начальных скоростей $V_о$ исследуемого и контрольного тел в нулевом сечении регистрации "0" и предположением о постоянстве коэффициентов $C_{xи}$ и $C_{xк}$ на измерительном участке траектории. Следует заметить, что в (3) и (4) не входят значения скорости $V_о$ и времен t_1 и t_2. Значение t_1 необходимо только для расчета скорости $V_о$, соответствующей искомым значениям коэффициентов $C_{xи}$ и $C_{xк}$:

$$V_о = \frac{1}{t_1} \frac{e^{x_{и1} b_и C_{xи}} - e^{x_{к1} b_к C_{xк}}}{b_и C_{xи} - b_к C_{xк}}$$

и не требуется для расчета самих коэффициентов, а время t_2 в опыте можно не определять.

При реализации предлагаемого способа в качестве контрольного тела может быть выбрано тело произвольной аэродинамической формы с неизвестным до опыта коэффициентом лобового сопротивления; тело, имеющее ту же аэродинамическую форму, что и исследуемое и отличающееся от него значениями $S_к$ и $m_к$; тело с заранее известным с большой точностью значением $C_{xк}$. В случае, когда контрольное тело имеет ту же аэродинамическую форму, что и исследуемое тело, уменьшается число сечений регистрации до двух, отпадает необходимость в определении величины перемещений $x_{и2}$ и $x_{к2}$. При этом система ур. (3) и (4) преобразуется в соотношение

$$\frac{e^{x_{и1} b_и C_{xи}} - 1}{b_и} = \frac{e^{x_{к1} b_к C_{xк}} - 1}{b_к}. \quad (5)$$

Уменьшается число измеряемых кинематических параметров и в случае, когда в качестве контрольного тела выбирают тело с заранее известным с большой точностью значением коэффициента лобового сопротивления $C_{xк}$. Искомый коэффициент $C_{xи}$ находят из соотношения (3). Перечисленный выбор контрольного тела зависит от условия, накладываемого, в конечном счете, на аэродинамические и массово-геометрические параметры метаемых тел. Это условие мы назвали "условием аэродинамической совместимости" и оно может иметь следующий вид:

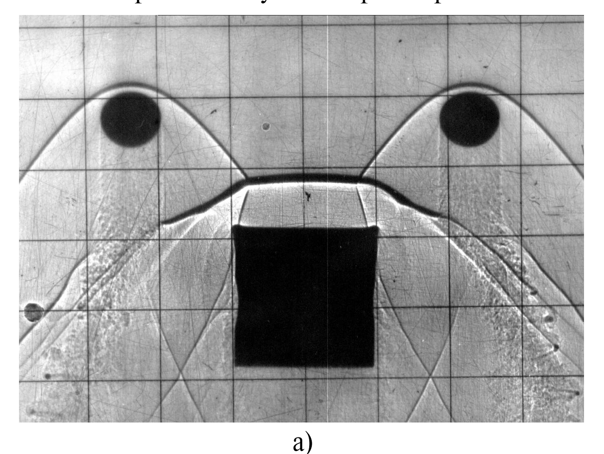
$$x_{и1} < \frac{1}{C_{xк} b_к}\left[e^{x_{к1} b_к C_{xк}} - 1\right] < x_{и1} e^{2 x_{и1} b_и}.$$

Физически это условие означает, что определяемые координаты метаемых тел в фиксированный момент времени t_1 должны располагаться в расчетной зоне выбранного сечения регистрации. Данное условие может быть использовано еще на стадии подготовки эксперимента.

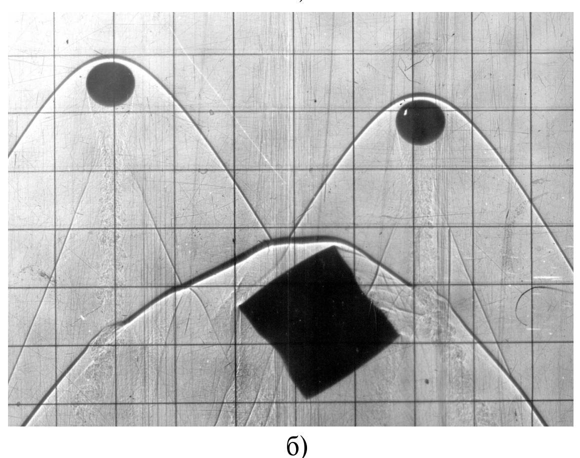
Принципы предлагаемого способа допускают множество вариантов применения его на практике. Так, если коэффициент лобового сопротивления считать зависящим от скорости, то эту зависимость можно записать в виде, как это предлагается в [1]

$$\frac{C_x}{C_{xо}} = \left(\frac{V}{V_о}\right)^{\alpha}, \quad (6)$$

где $C_{xо}$ – коэффициент силы лобового сопротивления, соответствующий величине начальной скорости $V_о$; α – показатель степени, характеризующий влияние скорости на коэффициент силы лобового сопротивления. Подставляя (6) в уравнения движения (1), после двукратного их интегрирования получим выражения для изменения координат исследуемого и контрольного тел, в которые будет входить величина α. Полагая в (6) α=0, мы получаем зависимости (2), для которых коэффициенты $C_{xи}$ исследуемого и $C_{xк}$ контрольного тел считаются постоянными на измерительном участке траектории.



а)



б)

Рис. 2. *Теневые снимки движения двух аэродинамически подобных тел для сечений регистрации: а) "0"; b) "1"*

Экспериментальные исследования проводились на баллистической трассе НИИ ПММ при ТГУ. Метательная установка имела диаметр 23 мм. Измерительный участок баллистической трассы равнялся 25 м. На нем последовательно располагались оптические станции регистрации, представляющие собой измерительные комплексы, использующие для визуализации обтекания движущихся тел и определения их координат метод "светящейся точки" [6], а для измерения скорости тел – бесконтактные блокирующие барьеры. Исследования проводились в диапазоне начальных скоростей $V_о$=680...1200 м/с.

Для получения равных начальных скоростей V_0 исследуемого и контрольного тел в нулевом сечении регистрации "0" они помещались в контейнер. Последний представлял собой цилиндр, со стороны головной части которого выполнялся осевой канал, разветвляющийся на два радиальных канала. Каналы соединялись с полостями, в которые помещались исследуемое и контрольное тела. Процесс выброса тел происходил через боковую поверхность контейнера под действием аэродинамических сил, создаваемых набегающим потоком газа [4].

На рис. 2 приведены теневые снимки движения в "0" и "1" сечениях регистрации двух аэродинамически подобных тел с одинаковыми C_x.

Видно, что в "0" сечении тела имеют одно и тоже начальное положение, что свидетельствует о равенстве их начальных скоростей V_0. Благодаря тому, что их коэффициенты b_u и $b_к$ имеют разное значение, одно из тел начало заметно опережать другое в "1" сечении (рис. 2). Устройство для выброса тел из контейнера исключает возникновение аэродинамических интерференционных явлений, обусловленных взаимовлиянием их обтекания.

Поэтому, определяя взаимное расположение тел на траектории в рассматриваемом случае, можно найти значение для их общего коэффициента лобового сопротивления, используя соотношение (5). Способ позволяет также определять неизвестные C_x одновременно для нескольких тел.

И, наконец, возможно использование эффекта группового движения тел и в случае проведения экспериментов, в которых определяются не перемещения исследуемого и контрольного тел на траектории, а промежутки времени, за которые они пролетают блокирующие барьеры.

Таким образом, теоретический анализ и проведенные экспериментальные исследования показали, что при соответствующем подборе параметров исследуемого и контрольного тел относительная ошибка определения неизвестного коэффициента C_x может быть не более 2...3 %. При этом сокращается количество станций регистрации и снижаются материальные затраты на проведение эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях // Под ред. Н.А. Златина и Г.И. Мишина. – М.: Наука, 1974. – 344 с.
2. Костров А.В., Шатило А.М. Модельно-экспериментальные методы определения аэромеханических характеристик летательных аппаратов на баллистических трассах. – М.: МО СССР, 1982. – 196 с.
3. Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика. – М.: Машиностроение, 1972. 584 с.
4. Якушев В.К. Способ определения коэффициента лобового сопротивления тел на основе эффекта группового движения // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. II научной конф. Волжского регионального центра РАРАН. – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2003. – С. 199–202.
5. Пат. 2145067 Россия. МПК G01M 9/00. Баллистический способ определения коэффициента лобового сопротивления тела / В.К. Якушев, В.И. Биматов, Р.Г. Николаев. Заявлено 8.05.1998; Опубл. 27.01.2000, Бюл. № 3. – 16 с: ил.
6. Оптические методы исследования в баллистическом эксперименте / Под ред. Г.И. Мишина. – М.: Наука, 1979. – 230 с.

УДК 553.06